

**Zeitschrift:** Schweizer Ingenieur und Architekt  
**Herausgeber:** Verlags-AG der akademischen technischen Vereine  
**Band:** 116 (1998)  
**Heft:** 12

**Artikel:** Struktur und Form: zur Entstehung materialgerechter Strukturformen  
**Autor:** Keller, Thomas  
**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-79467>

### **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

### **Conditions d'utilisation**

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

### **Terms of use**

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

**Download PDF:** 23.02.2026

**ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>**

Thomas Keller, Zürich

# Struktur und Form

## Zur Entstehung materialgerechter Strukturformen

**Die folgenden Ausführungen setzen sich mit einem Aspekt der Verknüpfung von Struktur und Form auseinander – den sogenannten materialgerechten Strukturformen. In einer Betrachtung auf der Zeitachse werden dabei materialabhängige Mechanismen der Formentstehung aufgezeigt. Diese stehen im Einklang mit übergeordneten Gesetzmässigkeiten der Technikgeschichte und sind auch eng mit der Entwicklung der Aufgabenteilung zwischen Architekt und Ingenieur verknüpft, auf die ebenfalls eingegangen wird.**

Unmittelbaren Anlass zu diesem Text gibt die erste in der Schweiz hergestellte Brücke aus Faserverbundwerkstoffen. Die Fussgängerbrücke wurde im November 1997 an der ETH Zürich von Studentinnen und Studenten der Architekturabteilung im Rahmen einer Seminarwoche zusammengebaut und am 15. Dezember 1997 in Pontresina der Öffentlichkeit übergeben. Die 25 m lange, zweifeldrige Brücke über den Flaz wird jeweils in den Wintermonaten eingesetzt – der temporäre Gebrauch wird durch das geringe Gewicht begünstigt.

Eine Interpretation der Ansicht der Brücke in Bild 1 zielt dabei direkt auf den Kern der folgenden Ausführungen: Die Brückenstruktur aus glasfaserverstärktem Kunststoff (GFK) ist formal von einer konventionellen Struktur in Stahl nicht zu unterscheiden, obwohl die beiden Baumaterialien unterschiedlicher wohl nicht sein könnten – warum?

Die Beantwortung der Frage erfordert deren Einbettung in einen grösseren geschichtlichen Zusammenhang, der im folgenden erläutert werden soll. Von Bedeutung sind dabei zwei grundlegende Aspekte – die zeitliche Entwicklung der Baumaterialien einerseits sowie die Entwicklung der Arbeitsteilung zwischen Ingenieur und Architekt andererseits. Die schematische Darstellung auf der Zeitachse in Bild 2 zeigt zudem, dass zwischen diesen beiden Aspekten auch Zusammenhänge bestehen. Auf beide soll im folgenden eingegangen und vor diesem Hintergrund auch aufgezeigt werden, wie die Strukturform der Brücke Pontresina zu begründen und einzuordnen ist.

### Rückblende

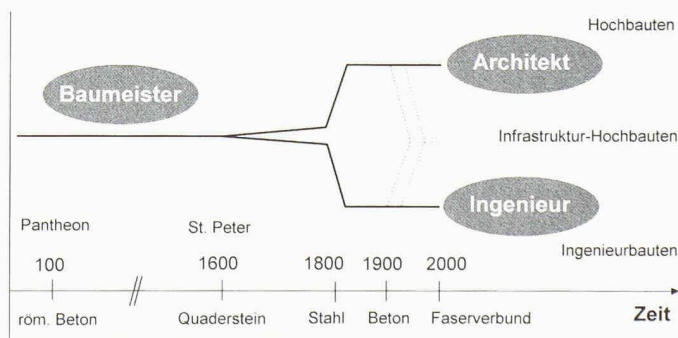
Bis ins 18. Jahrhundert waren die Funktionen des Ingenieurs und Architekten in der Person des Baumeisters vereint. Diesem standen zu jener Zeit im wesentlichen die Baumaterialien Quaderstein und Mauerwerk sowie kurzzeitig der römische Beton zur Verfügung. Nach Bild 3 weisen diese

Baumaterialien einen sehr geringen Nutzlastenfaktor auf – das Verhältnis der variablen Nutzlasten (eingeschlossen Wind, Schnee usw.) zur konstanten Eigenlast der massiv eingesetzten Baumaterialien ist sehr klein. In erster Linie bestand die Herausforderung und die Kunst für den Baumeister entsprechend darin, ein Bauwerk an sich überhaupt zu realisieren; die anschliessende Beanspruchung durch die Nutzung war praktisch unbedeutend. Dies und die damals nebst den Profanbauten beschränkte Anzahl Bautypen – zumeist Sakralbauten – ermöglichten das Erstellen der Bauten allein aufgrund der Erfahrung



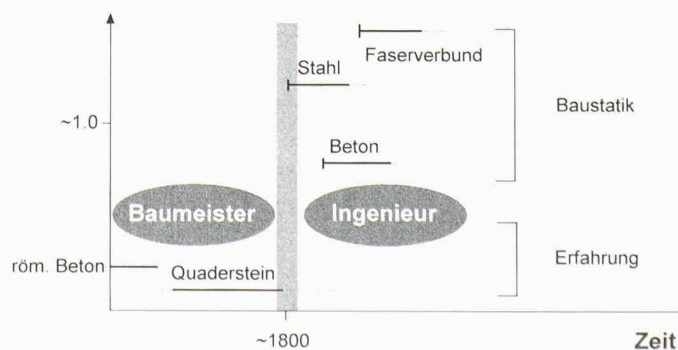
1  
Brücke Pontresina, 1997 – GFK in der Strukturform von Stahl

2  
Entwicklung der Baumaterialien und der Arbeitsteilung zwischen Architekt und Ingenieur



3  
Nutzlastenfaktoren von Baumaterialien und Entwicklung auf der Zeitachse

### Nutzlastenfaktor (Nutzlast / Eigenlast)



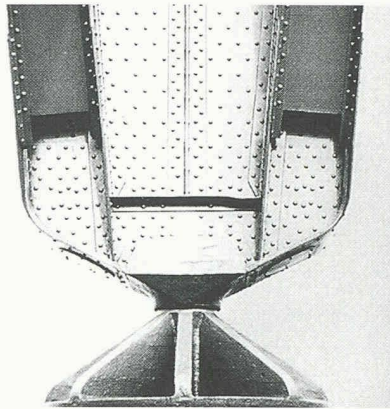


des Baumeisters. Wichtige Meilensteine in der Entwicklung waren dabei der Bau des Pantheons 118–125 n. Chr. sowie der St. Peterskuppel 1452–1667, beide in Rom.

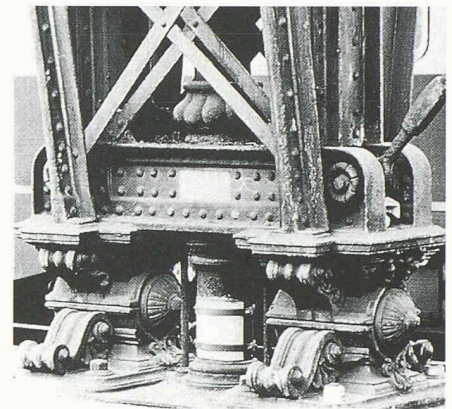
Die Kuppel des Pantheons weist eine Spannweite von 43,3 m auf, die bis zum Bau der Jahrhunderthalle in Breslau 1912 nicht mehr erreicht wurde. In statisch günstiger Weise weicht die Strukturform von der damals gebräuchlichen Kreisform ab. Die Zuschläge des verwendeten römischen Betons wurden zudem nach spezifischem Gewicht abgestuft eingesetzt. Im Kuppelscheitel wurde leichter Bims- und Tuffstein, im Fussbereich schwerer Travertin verwendet. Strukturform und differenzierter Einsatz des Baumaterials – bei des Ausdruck der Erfahrung des Baumeisters.

Der Bau der St. Peterskuppel mit 21,7 m Spannweite markiert den Beginn eines Wandels. Die Kenntnis des römischen Betons ging im Mittelalter verloren, die Kuppelbauten der Renaissance wurden aus Quaderstein und Mauerwerk gebaut – entsprechend reduzierten sich auch die möglichen Spannweiten. Obwohl das Tragverhalten von Kuppeln seit Leonardos Studien um 1500 qualitativ bekannt war, stiess man an die Grenzen der Möglichkeiten, welche die Erfahrung noch zulies. Beinahe sämtliche Kuppelbauten dieser Zeit wiesen Risse auf, so auch die St. Peterskuppel. 1743–48 wurde hier von Giovanni Poleni eine der ersten quantitativ-wissenschaftlichen Untersuchungen der Rissursachen durchgeführt – der eigentliche Beginn der Baustatik. Die Dualität von Stütz- und Hängelinie nutzend, überprüfte Poleni die Strukturform der Kuppel mit einem Kettenmodell.

1811, beim Bau der Getreidehalle in Paris, wurden zum ersten Mal die Funktionen des Architekten und Ingenieurs getrennt an zwei verschiedene Personen vergeben: an den Architekten Bellangé und den Ingenieur Brunet. Diese Trennung der bis zu Beginn des 18. Jahrhunderts im Baumeister vereinten Funktionen ist eng mit dem Aufkommen des Baumaterials Stahl (vorerst Gusseisen) verbunden. Durch industrielle Produktion stand dieses Baumaterial plötzlich in grossen Mengen zur Verfügung. Die im Rahmen der Industrialisierung allgemein explodierende Zunahme an Waren jeglicher Art erforderte zudem ganz neue Bautypen: Markthallen, Ausstellungshallen, Bahnhofshallen, Brücken. Der hohe Nutzlastenfaktor des neuen Baumaterials (Stahl, Bild 3) sowie die grösseren Spannweiten dieser neuen Bautypen setzten entsprechende statische Analysen voraus; Bauen allein aufgrund von Erfahrung war nicht mehr möglich. Die unter anderem an der 1747 gegründeten «École



4  
Stützenfussdetail – funktionale Form



5  
Stützenfussdetail – historisierende Form

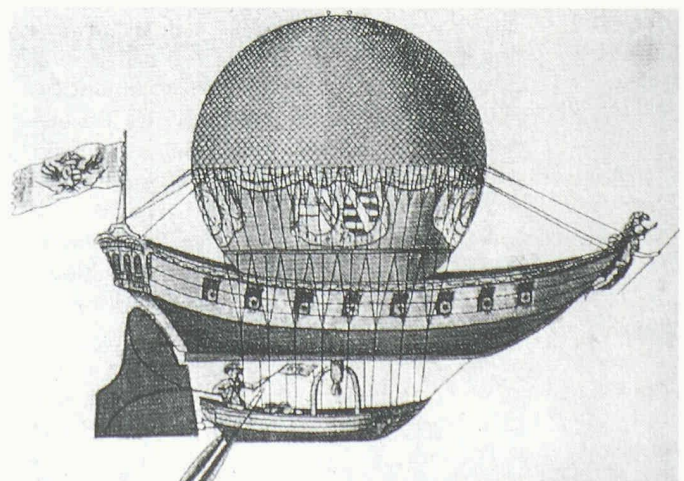
des ponts et chaussées» ausgebildeten Ingenieure und Konstrukteure bewältigten diese Bauaufgaben mit einer eigenen charakteristischen funktionalen Formensprache (Bild 4). 1779 erfolgte der Bau der ersten Eisenbrücke in Coalbrookdale über den Severn mit 30 m Spannweite durch Abraham Darby, der bezeichnenderweise ein Eisengiesser war. Die der «École des beaux arts» verpflichteten Architekten jener Zeit hingegen verharrten in rückwärtsgewandten klassizistischen, historisierenden Stilvermischungen (Bild 5). Henry van de Felde bemerkte 1901: «Diese Künstler, diese Schöpfer der neuen Architektur, sind die Ingenieure.»

### Materialgerechte Strukturformen

Mit dem neuen Baumaterial Stahl setzte im weiteren ein Mechanismus ein, der in der Technikgeschichte charakteristisch ist. Eine neue Form der Technik wurde bisher immer zuerst mit traditionellen Anwendungen verknüpft (Bild 6). Im Baubereich äussert sich diese Gesetzmässigkeit in der

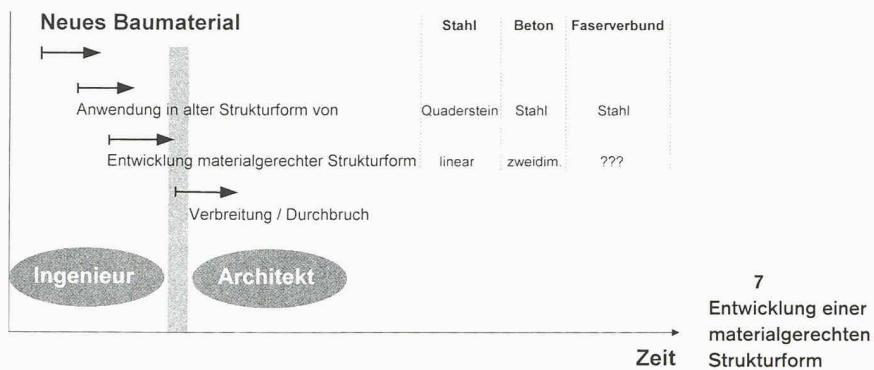
Entwicklung materialgerechter Strukturformen für jeweils neue Baumaterialien (Bild 7): Ein neues Baumaterial wurde bis anhin immer zuerst in der Strukturform der bekannten, traditionellen Materialien eingesetzt. Da sich die Materialeigenschaften aber unterschieden, erfolgte diese Verwendung nicht materialgerecht – die spezifischen, meist vorteilhaften Eigenschaften des neuen Materials konnten dadurch nicht vollumfänglich genutzt werden. Erst die allmähliche Entwicklung neuer, materialgerechter Strukturformen durch die Ingenieure erlaubte einen wirtschaftlichen, vorteilhaften Einsatz der neuen Materialien und führte erst dann zur verbreiteten Verwendung auch durch die Architekten – ein Mechanismus, der zusätzlich zur Aufgabentrennung zwischen Architekt und Ingenieur beitrug.

Bild 8 zeigt eine der ersten Eisenbrücken, die Southwarkbrücke über die Themse in London, 1819 erbaut, mit 73 m Mittelspannweite die grösste dieser Art. Der Bogen der Brücke ist dabei aus quaderförmigen eisernen Wölbstücken zusammengesetzt – die traditionelle und ma-



6  
Projekt für ein Luftschiff im 18. Jh.





strukturen, bezeichnenderweise wieder eine Brücke, wurde 1875 in Chazelet (F) von Joseph Monier mit 16 m Spannweite erbaut.

Beton wurde zuerst vorwiegend in der traditionellen Strukturform von Stahl eingesetzt (Bild 7). Gebaut wurde in linearen Elementen – als Beispiel die bereits erwähnte, 1912 gebaute Rippenkuppel der Jahrhunderthalle Breslau mit 65 m Spannweite (Bild 9), in ihrer Strukturform praktisch deckungsgleich mit der 1909 errichteten Stahlkuppel der Ausstellungs- und Festhalle Frankfurt. Ebenso 1912 baute Robert Maillart – Ingenieur und Unternehmer – das Getreidelager in Altdorf mit seinen charakteristischen Pilzdecken. Als einer der ersten erkannte er das Potential von Beton zur Ausbildung von Flächen-tragwerken und trug damit massgeblich zur Entwicklung des Beton-Plattenskeletts bei. 1915 schliesslich entwarf Le Corbusier sein Haus Domino, das auf dieser neuen Strukturform basierte, und formulierte dabei sein wegweisendes 5-Punkte-Programm: die frei stehende Stütze, die funktionelle Unabhängigkeit von Skelett und Wand, der freie Grundriss, die freie Fassade sowie der Dachgarten.

Wiederum rund 100 Jahre nach der ersten Betonbrücke entstanden Ende der 70er Jahre dieses Jahrhunderts die ersten Brücken aus Faserverbundwerkstoffen. Faserverbundwerkstoffe sind leichte, hochfeste Verbundmaterialien mit entsprechend hohem Nutzlastenfaktor (Bild 3).

Der verbreitete Einsatz dieser Baustoffe erfolgt heute vor allem im Maschinen-, Fahrzeug- und Flugzeugbau. Im Baubereich konnten sich Faserverbundwerkstoffe trotz vorteilhafter Materialeigenschaften bisher noch nicht durchsetzen. Ein hauptsächlicher Grund liegt darin, dass für diese Baumaterialien noch keine materialgerechten Strukturformen existieren, die den spezifischen anisotropen Materialeigenschaften Rechnung tragen (Bild 7). Der Einsatz erfolgt vornehmlich in der traditionellen Strukturform von isotropem Stahl, wie eben auch bei der Brücke in Pontresina. Im Pultrusionsverfahren werden lineare Kunststoffprofile mit komplexen Matrixverstärkungen aus Vliesen, Geweben und linearen Faserbündeln hergestellt, die sich von gewalztem Stahl formal nicht unterscheiden. Die vorzüglichen Fasereigenschaften werden dadurch nur sehr begrenzt genutzt. In ebenso ungünstiger Weise erfolgt bisher die Verbindungstechnik – analog zu Stahl werden die Profile mit Schrauben zusammengefügt. Die Brücke in Pontresina stellt insofern eine Innovation und auch eine Weltneuheit dar, als bei einem Brückenfeld die Knoten erstmals vollständig geklebt wurden – eine we-

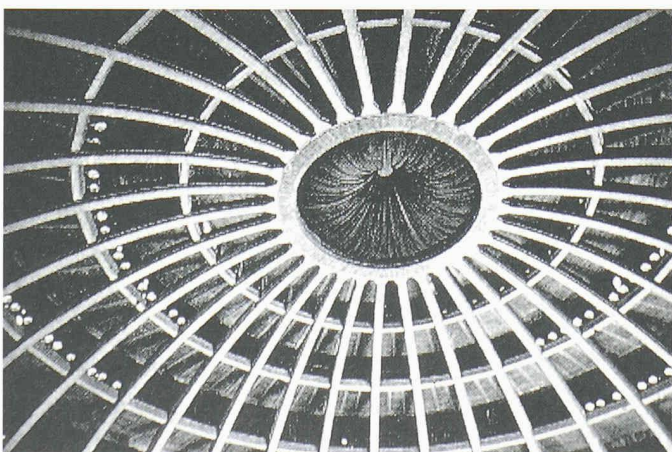
terialgerechte Strukturform von Quaderstein. Erst im Laufe des 19. Jahrhunderts entwickelten die Ingenieure materialgerechte Strukturformen für Eisen und Stahl sowie entsprechende Verbindungstechniken. Im Brückenbau waren dies in erster Linie die aus linearen Elementen aufgebauten genieteten Fachwerke Gustave Eiffels. Im Hochbau entwickelte sich allmählich das Stahlrahmenskelett. Ein Meilenstein in dieser Entwicklung bildete dabei der 1851 von Joseph Paxton anlässlich der ersten Weltausstellung in London erbaute Kristallpalast, der einen ganz neuen Baustil aus Stahl und Glas begründete, charakterisiert durch Transparenz, Entmate-

rialisierung und Vorfabrikation. Die Verbindungen der Strukturelemente wurden dabei noch nicht biegesteif ausgebildet. Das erste eigentliche Stahlskelett mit biegesteifen Verbindungen baute Jules Saulnier 1872 bei der Menier-Fabrik in Noisiel-sur-Marne. Mies van der Rohe war es dann, der als einer der ersten Architekten bereits in den 20er Jahren dieses Jahrhunderts das Potential dieser neuen Bauweise zur Nutzung als architektonisches Ausdrucksmittel erkannte und konsequent umsetzte.

Rund 100 Jahre nach der ersten Eisenbrücke setzt die analoge Entwicklung beim (Stahl-)Beton ein. Eine der ersten Beton-



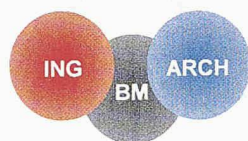
8  
Brücke Southwark  
London, 1819 – Eisen  
in der Strukturform  
von Quaderstein



9  
Kuppel der Jahrhunderthalle Breslau,  
1912 – Beton in der  
Strukturform von  
Stahl. Aus: Heinle E.,  
Schlaich J.: «Kuppeln  
aller Zeiten –  
aller Kulturen»  
(Abdruck mit freundlicher  
Genehmigung der Deutschen  
Verlags-Anstalt, Stuttgart)



## Utilitas



## Firmitas

10

Entwurfsziele nach Vitruv –  
Stellung von Ingenieur und Architekt

## Venustas

sentlich materialgerechtere Verbindungstechnik.

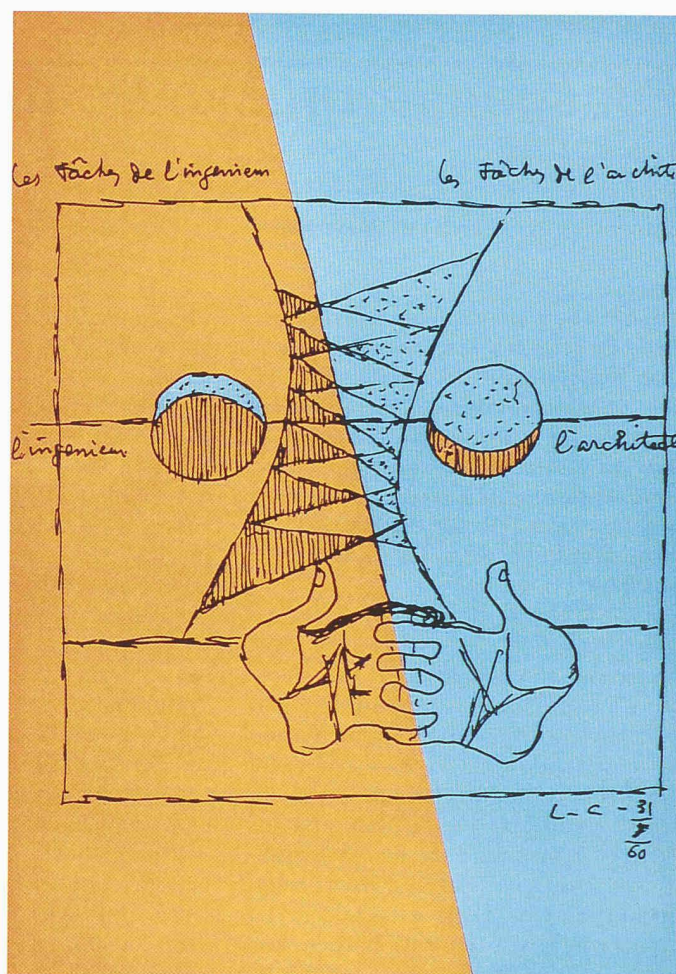
Die Forschung nach materialgerechten Strukturformen für Faserverbundwerkstoffe ist weltweit im Gange. Kompliziert wird die Entwicklung durch die enge Verknüpfung von materialgerechter Strukturform und Herstellungstechnik, die selbst noch einem Entwicklungsprozess unterliegt. 1983 waren in Europa, Nordamerika, Japan und China rund 30 Zentren und Institutionen mit entsprechender Forschung und Entwicklung beschäftigt, heute sind es über 300. Ein Durchbruch ist dabei jedoch, auch gemessen an den Erfahrungen bei Stahl und Beton, sicherlich nicht vor zehn bis zwanzig Jahren zu erwarten. Bemerkenswert ist in diesem Zusammenhang, dass die Architekturstudenten, welche die Brücke Pontresina gebaut haben, bereits heute dieses zukunftsweisende Baumaterial kennengelernt haben.

## Aufruf

Im Verhältnis zwischen Architekt und Ingenieur sind heute zwei unterschiedliche Tendenzen auszumachen – eine trennende und eine verbindende (Bild 2). Erstere manifestiert sich auch in unterschiedlichen Bautypen. Hochbauten, die sich mit kleineren Spannweiten am menschlichen Massstab orientieren, rutschen vor allem bei der Verwendung von Beton mit nicht sehr hohem Nutzlastenfaktor in den Erfahrungsbereich (Bild 3). Hier ist der Architekt unangefochten Gesamtleiter, der Ingenieur Spezialist.

Umgekehrt bei den Ingenieurbauten mit eher grossen Spannweiten, die sich im Massstab an Breiten von Tälern, Flüssen und Strassen orientieren: Hier stehen Naturgesetze – ausgedrückt durch die Baustatik eben – im Vordergrund. Entsprechend rückt der Ingenieur ins Zentrum des Planungsprozesses, der Architekt übt die

11  
Le Corbusier – l'ingénieur et l'architecte



Spezialistenfunktion aus. Diese mit einer gewissen Hierarchie verbundene Arbeitsteilung lässt sich anschaulich mittels der von Vitruv formulierten drei grundlegenden Entwurfsziele gemäss Bild 10, mit entsprechenden Verschiebungen des Architekten und Ingenieurs aus dem Zentrum des Baumeisters, aufzeigen.

Die verbindende Tendenz zeigt sich bemerkenswerterweise genau bei jenem Bautyp, bei dem vor rund 200 Jahren die Trennung der Funktionen stattgefunden hat: bei den Infrastruktur-Hochbauten wie Kultur- und Kongresszentren, Messe- und Bahnhofshallen. Dieser Bautyp hat sich mit mittleren Spannweiten sowohl am menschlichen Massstab wie auch an Naturgesetzen zu orientieren, was sich erfreulicherweise in einer Annäherung der Funktionen von Ingenieur und Architekt manifestiert. Die hierarchische Organisationsform wird überwunden, die Zusammenarbeit erfolgt partnerschaftlich im Team, eine Voraussetzung für in jeder Hinsicht überzeugende Bauten – eine Voraussetzung auch im Hinblick auf die zukünftige materialgerechte Verwendung neuer Baumaterialien, wie beispielsweise Faserverbundwerkstoffe mit sehr hohem Nutzlastenfaktor.

In diesem Sinne, verbunden mit einer entsprechenden Darstellung Le Corbusiers in Bild 11, sei abschliessend zu einer Intensivierung dieser partnerschaftlichen Zusammenarbeit zwischen Architekt und Ingenieur aufgerufen und zwar bautypenübergreifend, das gegenseitige Spezialistentum überwindend, in der Überzeugung, dass jeder Bautyp davon nur profitieren kann.

Adresse des Verfassers:

Thomas Keller, dipl. Bauing. ETH, Prof. Dr. sc. techn., Winiger, Kränzlin & Partner, Verena Konzett-Strasse 7, 8004 Zürich